جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره بیست و سوم، پائیز ۱۳۹۶
صص ۱۷۹-۱۶۳

DOI: 10.22067/geo.v6i3.61868

ارزیابی داده‌های بارندگی حاصل از ماهواره TRMM، مدل MM5 و مشاهدات زمینی به صورت مکانی-زمانی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کوهستانی

نگار سیابی- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سید حسین ثنایی نژاد[1]- دانشیار هواشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
بیژن قهرمان- استاد آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۷   تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۳/۳

چکیده

در مواجه با خطر سیل و یا خسارات ناشی از خشکسالی، برآورد میزان بارش و الگوی تغییرات مکانی آن در یک منطقه گسترده، یکی از چالش‌های مهم در علوم هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی است. اندازه‌گیری محلی بارندگی در مناطق دور افتاده به دلیل هزینه زیاد و محدودیت‌های عملیاتی دشوار است. بدین علت در تحقیق حاضر به‌منظور تعیین الگوی مکانی-زمانی بارش و امکان تلفیق داده‌ها، سه نوع مختلف از تولیدات بارندگی شامل داده‌های ماهواره‌ای (TRMM3B42)، داده‌های حاصل از مدل پیش‌بینی عددی جوّی (MM5) و اندازه‌گیری‌های زمینی (نقشه‌های حاصل از روش زمین‌آمار (KED))، مورد مطالعه قرار گرفتند. این مطالعه در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ میلادی و برای منطقه شمال شرق ایران به صورت ماهانه، فصلی و سالانه انجام شد. داده‌ها با استفاده از شاخص اعتبارسنجی RMSE و الگوریتم تشابه با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که یکی از ضعف‌های روش زمین‌آمار نبودن اطلاعات کافی در ارتفاعات بالای (۱۵۰۰) متر منطقه است. همچنین دقت تصاویر ماهواره‌ای در فصل‌های گرم بیشتر بود؛ بطوریکه در ماه آگوست مقدار RMSE = ۱/۷ به دست آمد. در فصل زمستان (ماه ژانویه) بیشترین مقدار RMSE = ۱۴/۰۲ حاصل شد که این امر عملکرد ضعیف تولیدات ماهواره‌ای TRMM در مناطق پوشیده از یخ را نشان می‌دهد. در اعتبارسنجی مدل MM5 بیشترین و کمترین مقدار RMSE به ترتیب ٦/٦٤ و ۱/۰۵ به دست آمد. علاوه بر این مدل MM5 تا حدود زیادی در شبیه‌سازی مقادیر بارندگی سالانه بیش‌برآورد داشت. نتایج تحلیل‌های مکانی- زمانی الگوریتم تشابه نیز نشان دادند که عملکرد مدل

۱ نویسنده مسئول : ۰۵۱۳۸۸۰۵۷۱۷
Email: sanaein@gmail.com

MM5 در مقیاس ماهانه و فصلی و تعیین مناطق بارندگی بهتر از تصاویر ماهواره‌ای TRMM بود. همچنین هر سه محصول الگوی مکانی بارندگی در مقیاس فصلی و سالانه را به‌خوبی نشان دادند.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم تشابه، بارندگی، TRMM، MM5

۱. مقدمه

تخمین دقیق بارندگی در مناطقی با ویژگی‌های جغرافیایی پیچیده در زمینه اقلیم‌شناسی، هواشناسی کشاورزی و هیدرولوژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ اما وسعت نواحی و تغییرات شدید زمانی – مکانی بارش، اندازه‌گیری‌ها را مشکل می‌سازد. عدم وجود داده‌های مکانی بارش از چالش‌های مهم در پیش‌بینی وقوع سیل یا خشکسالی و هشدار به‌موقع در این موارد است. یکی از راهکارهای ارائه شده در این مورد، اندازه‌گیری بارندگی از فضا است. تکنیک سنجش‌ازدور تصاویر کامل‌تری از ساختار سیستم‌های بارندگی ارائه می‌کند و در چند دهه اخیر توسعه چشمگیری یافته است. از این میان ماهواره TRMM[1] اولین تلاش بین‌المللی برای اندازه‌گیری قابل اعتماد بارش از فضا می‌باشد (اسمیت[2] و همکاران، ۲۰۰۷: ٦۱۱). یکی دیگر از مجموعه داده‌هایی که در سال‌های اخیر در دسترس قرار گرفته است، خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی است. مدل‌های مذکور با حل معادلات اولیه حاکم بر جو و زمین به محاسبه پارامترهای مختلف محیطی و هواشناسی مانند بارندگی در پیکره شبکه‌بندی شده کره زمین می‌پردازند (میج[3] و همکاران، ۲۰۰۹ :٦٦۱۱). هر یک از مجموعه داده‌های ذکر شده، نقاط ضعف و قوت خود را دارند. به‌عنوان‌مثال اندازه‌گیری‌های زمینی در عین اینکه تنها اندازه‌گیری مستقیم بارندگی هستند در مناطق کوهستانی پراکندگی مکانی اندکی دارند (اسچیل[4] و همکاران،۲۰۱۱: ۲٦٤۹). باران‌سنج‌ها اغلب در مجاورت روستاها نصب می‌شوند بدین ترتیب در مناطق غیرمسکونی عملاً نمونه اندازه‌گیری بارش وجود ندارد. از مزایای تولیدات سنجش‌ازدور می‌توان به پوشش نواحی زیادی از سطح زمین اشاره کرد بااین‌حال تصاویر مربوط به اواسط دهه ۱۹۸۰ که فقط با تکیه بر امواج مادون قرمز تهیه شده‌اند، در تخمین بارندگی و مخصوصاً بارندگی‌های همرفتی و گرادیان شدید بارش دقت کافی را ندارند. محصولات جدید ماهواره‌ای از ترکیب امواج مادون‌قرمز و مایکروویو و داده‌های زمینی برای شناسایی بارش‌های شدید استفاده می‌کنند، اما هنوز تفاوت چشمگیری میان تولیدات مختلف ماهواره‌ای و استفاده از آن‌ها در مناطق مختلف وجود دارد (وارد[5] و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۲۲۲). همچنین تولیدات ماهواره در تشخیص بارش مایع از جامد عملکرد ضعیفی دارند. گروه دیگری از داده‌ها در بررسی مکانی– زمانی بارش، پیش‌بینی مدل‌های جوی هستند. مدل‌ها می‌توانند انسجام فیزیکی اجزا مختلف بودجه آب محاسبه شده را

1 Tropical Rainfall Measurement Mission
2 Smith
3 Meij
4 Scheel
5 Ward

حفظ نمایند. همچنین با پیش‌بینی‌های مدل، مطالعه تغییر چرخه آب بر اثر تغییر اقلیم در آینده میسر می‌شود. با وجود مزیت‌های فراوان، مدل‌های آب و هوایی در شبیه‌سازی فرآیندهای محلی و بارش مناطق کوهستانی خطا دارند. مقدار خطا به میزان پیچیدگی جغرافیایی مناطق مختلف بستگی دارد (میج و همکاران، ۲۰۰۹: ٦٦١١). عملکرد مدل‌های منطقه‌ای نیز به منطقه مورد مطالعه، تفکیک مکانی و پارامترهای مورد استفاده در آن بستگی دارد (باکس[1] و بروموویچ[2]، ۲۰۰٤: ۱). با توجه به مزایا و معایب هر یک از مجموعه داده‌ها، تحقیقات متعددی جهت اعتبارسنجی و مقایسه این داده‌ها انجام شده است.

برخی از مطالعات به مقایسه تصاویر TRMM با سایر داده‌های اندازه‌گیری شده پرداخته‌اند (هافمن[3] و همکاران، ۱۹۹۵: ۱۲۸٤؛ ابرت[4] و همکاران، ۲۰۰۷: ٤٨). برخی دیگر، خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی را با تصاویر ماهواره‌ای و سایر داده‌ها مقایسه کرده‌اند. به‌عنوان‌مثال اکتر[5] و اسلام[6] (۲۰۰۷: ۷۵)، برای پیش‌بینی وضع هوا از جمله بارندگی در منطقه بنگلادش از مدل MM5[7] استفاده کردند. ایشان این مدل را با دو تفکیک مکانی ٤٥×٤٥ و ۱۵×۱۵ کیلومترمربع اجرا کردند. هدف از این مطالعه دستیابی به پیش‌بینی بهتر بارش‌های شدید و توانایی هشدار قبل از وقوع سیل بود. این محققین خروجی مدل MM5 را با مجموعه داده 3B42RT ماهواره TRMM و باران‌سنج و داده‌های رادار مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که مدل MM5 با هر دو تفکیک مکانی، از قابلیت خوبی برای پیش‌بینی بارش برخوردار است. وونگ[8] و چیو[9] (۲۰۰۸: ۱۰۵)، به آنالیز ساختار مکانی و زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی و اطلاعات استخراج شده از TRMM در هنگ‌کنگ پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که تغییرات درون‌سالانه زیادی بین اندازه‌گیری بارندگی و داده‌های سنجش‌ازدور وجود دارد. این پژوهشگران نشان دادند که با افزایش اندازه شبکه، مقدار میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) کاهش می‌یابد. در این تحقیق ضریب همبستگی میان بارندگی ۳ ساعته TRMM با اندازه شبکه ۰/۵×۰/۵ و تغییرات درون سالانه زیاد، ۰/۳۵ به دست آمد.

اچوا[10] و همکاران (۲۰۱٤: ۳۱۷۹)، تولیدات 3B42 ماهواره TRMM را با بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF ارزیابی و مقایسه نمودند. منطقه مورد مطالعه ایشان اکوادور و پرو بود. هدف آن‌ها یافتن مناطقی بود که در آنجا داده‌های مدل و یا سنجش‌ازدور الگوی مکانی – زمانی را بهتر نشان می‌دهند. نتایج حاصل مشخص کرد که

---

1 Box
2 Bromwich
3 Huffman
4 Ebert
5 Akter
6 Islam
7 Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
8 Wong
9 Chiu
10 Ochoa

TRMM در نشان دادن توزیع مکانی میانگین بارندگی سالانه عملکرد بهتری نسبت بـه مـدل دارد. بـه‌طورکلی هـر دو مجموعه داده بارندگی‌های ماهانه و سالانه را نسبت به بازه روزانه بهتر تخمین زدند. همچنین در هـر دو مجموعـه داده احتمال تشخیص بارندگی بـا سـرعت‌هـای کـم بیشـتر از بارش‌هـای شـدید بـود. آزادی و همکـاران (۱۳۸۹: ۱٤۸)، خروجی بارش دو مدل MM5 و WRF را در مناطق مختلف ایران و یـک دوره هشـت ماهـه، مقایسـه کردنـد. نتـایج نشان دادند که هر دو مدل در مورد بارش فرا پیش‌بینـی دارنـد و هشـدارهای نادرسـت مـدل WRF بیشـتر از MM5 است. هدایتی دزفولی و آزادی (۱۳۸۹: ۱۲۹)، پیش‌بینی بـارش مـدل منطقـه‌ای MM5 را روی ایـران مـورد بررسـی و راستی آزمایی قرار دادند. آن‌ها با توجه به ویژگی‌های ناهمواری، اقلیمی و میانگین بارش، کشور را به ۹ منطقـه تقسـیم کردند و برای هر منطقه راستی آزمایی جداگانـه‌ای را انجـام دادنـد. ایـن پـژوهش نشـان داد کـه توانـایی مـدل بـرای آستانه‌های بارش بسیار کم و زیاد در مناطق جنوبی و شمالی بیشتر است و خروجی مدل در این موارد دقـت بیشـتری دارد.

بر اساس بررسی منابع مختلف، در ایران تحقیقات اندکی در مورد مقایسه خروجـی بارنـدگی مـدل‌های پیش‌بینـی عددی با محصولات TRMM انجام شده است و اغلب تحقیقات به راسـتی آزمـایی یـک مـدل یـا مقایسـه خروجـی مدل‌های پیش‌بینی عددی با یکدیگر پرداخته‌اند. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که اغلـب مطالعـات مذکور از روش‌های آماری برای مقایسات بهـره گرفته‌انـد. در ایـن تحقیـق عـلاوه بـر روش‌هـای مقایسـه آمـاری، از الگوریتم مکانی – زمانی تشابه نیز استفاده شده است. الگوریتم تشابه می‌تواند برای مقایسه کمی همزمان تعـداد زیـادی از نقشه‌ها با چندین متغیر و نیز انجام این مقایسه به صورت تلفیقی مکانی – زمانی، اسـتفاده شـود (هرزفلـد[1] و مریـام، ۱۹۹۰: ٤۳). این الگوریتم برای مقایسه کمی همزمان تعداد زیادی داده استفاده می‌شود. چنین داده‌ها می‌تواننـد در قالـب نقشه و یا خروجی مدل‌ها باشند. روش مقایسه مکانی با استفاده از الگوریتم تشابه، اولین بار برای اکتشاف نفـت مـورد استفاده قرار گرفت (هرزفلد و مریام، ۱۹۹۰: ٤۳). دوربوت[2] و همکاران (۲۰۰٦: ۱) در بررسی توزیـع مکـانی تشـابه و عدم تشابه بین مجموعه داده‌های دما و بارندگی از الگوریتم تشابه استفاده کردنـد. آن‌هـا از ایـن روش بـرای شناسـایی ماه‌های مشکل‌ساز در تحلیل داده‌های زمانی استفاده نمودند. ایشان الگوریتم تشـابه جبـری را بـه دلیـل توانـایی‌اش در بررسی تعداد زیادی نقشه ورودی انتخاب کردند.

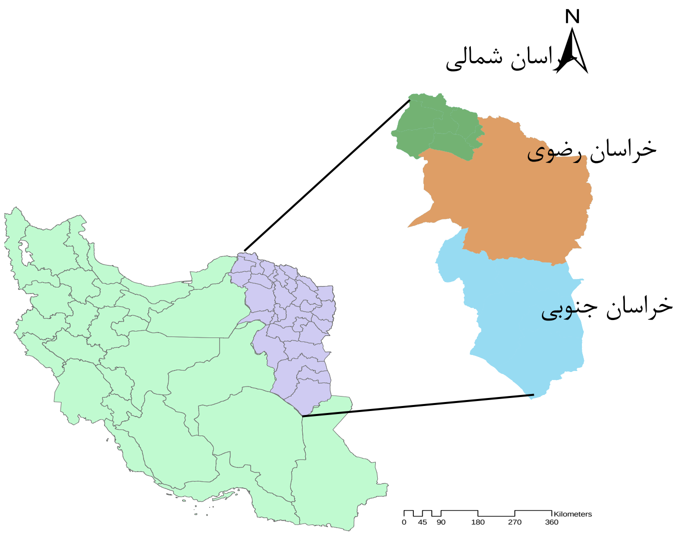
با توجه به اهمیت داده‌هـای بـارش در پیش‌بینـی وقـوع مخـاطراتی ماننـد سـیل و خشکسـالی، همچنـین وجـود محدودیت‌های اقتصادی، جغرافیایی و اجتماعی در افزایش تعداد نقاط اندازه‌گیری اطلاعات بارنـدگی، یـافتن منـاطقی که در آنجا داده‌های مدل و یا سنجش‌ازدور الگوی مکانی – زمانی بارش را بهتر نشان دهند، ضروری به نظـر می‌رسـد. این امر در مناطق کوهستانی و اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک اهمیت بسـزایی دارد. هـدف تحقیـق حاضـر ارزیـابی و

1 Herzfeld
2 Drobot

مقایسه انواع داده‌های بارش با استفاده از روش‌های آماری و الگوریتم تشابه به صورت مکانی و در بازه زمانی مختلف، به‌منظور استفاده از اطلاعات آن‌ها در نواحی و زمان‌های فاقد داده است.

۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه استان‌های خراسان شمالی، خراسان رضوی و خراسان جنوبی واقع در شمال شرق ایران و بین طول ۵۵ تا ٦۱ درجه شرقی و عرض ۳۰ تا ۳۸ درجه شمالی می‌باشد (شکل ۱). اقلیم کلی منطقه نیمه‌خشک تا خشک است (احمدیان و همکاران، ۱۳۸۰: ۵۹۳). وسعت کل ناحیه ۳۱۳۰۰۰ کیلومترمربع بوده و بلندترین نقطه منطقه با ارتفاع ۳۳۰۰ متر بالاتر از سطح دریا در قله بینالود واقع شده و پست‌ترین نقطه با ارتفاع ۲۵۰ متر بالاتر از سطح دریا در محل خروجی دشت سرخس قرار گرفته است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

۳. مواد و روش‌ها

داده‌های اندازه‌گیری ایستگاه زمینی

در تحقیق حاضر از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیکی، ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی و ایستگاه‌های آب منطقه‌ای خراسان استفاده شد. اطلاعات مربوط در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ از سازمان هواشناسی کشور و سازمان وزارت نیرو دریافت شدند. به‌منظور افزایش دقت محاسبات از میان ایستگاه‌های موجود آن‌هایی که داده‌های گم‌شده کمتری داشتند انتخاب شدند.

داده‌های TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)

سری هفتم تولیدات 3B42 سنجنده TRMM به عنوان یکی دیگر از داده‌های ورودی الگوریتم‌های پیشنهادی استفاده شد. تولیدات مذکور حاوی داده‌های بارندگی سه ساعته در سطح زمین است و از سال ۱۹۹۸ در دسترس می‌باشند. در این مجموعه داده برای تولید تصاویر بارندگی از ترکیب اطلاعات سنجش‌ازدور (تصویرگر ریزموج، رادار بارندگی، پویش‌گر مادون قرمز و مرئی) و مشاهدات ماهانه محلی استفاده شده است (هافمن[1] و بولوین[2]، ۲۰۱۲). تولیدات TRMM ناحیه‌ای بین ۵۰ درجه شمالی تا ۵۰ درجه جنوبی را با تفکیک مکانی ۰/۲۵ (تقریباً ۲۷ کیلومتر) پوشش می‌دهد. در این مطالعه سری زمانی تولیدات TRMM از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ از سایت سازمان NASA[3] (http://pmm.nasa.gov/) به صورت رایگان دریافت شدند. یکی آر نقاط ضعف داده‌های TRMM تفکیک زمانی کم آن است. بطوریکه تعداد عبور آن یک یا دو بار در روز و وابسته به مکان مورد نظر است. این عامل سبب از دست رفتن اطلاعات عظیمی در بازه زمانی کوتاه مربوط به طوفان‌ها و رگبارها می‌شود (وارد[4] و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۲۲۲). بااین‌وجود داده‌های TRMM در مناطق کوهستانی که فاقد ایستگاه‌های باران‌سنجی می‌باشند، مهم بوده و می‌تواند در مطالعات هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده قرار گیرند.

داده‌های پیش‌بینی مدل MM5

با پیشرفت علوم کامپیوتر و هواشناسی سینوپتیکی، شمار زیادی از مدل‌های عددی میان‌مقیاس برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی حرکات جو و متغیرهای هواشناسی استفاده شدند. مدل MM5 (نسل پنجم مدل میان‌مقایس NCAR/Penn State) نیز از این قاعده مستثنی نبوده و برای پیش‌بینی متغیرهای جوی در مقیاس سینوپتیک به کار می‌رود. این مدل از معادلات اولیه غیرهیدرواستاتیک برای پیش‌بینی‌ها استفاده می‌کند. مختصات عمودی مدل σ و مختصات افقی آن Arakawa B-grid می‌باشد. به‌طور خلاصه مدل MM5 یک مدل منطقه محدود، غیر ایستا و متأثر از عوارض زمین است که برای شبیه‌سازی یا پیش‌بینی گردش میان مقیاس جو طراحی شده است. همچنین شبکه‌بندی مدل MM5 بر اساس کاربردهای خاص قابل تنظیم است (گرل[5] و همکاران، ۱۹۹۵). در این تحقیق داده‌های مربوط به پیش‌بینی مدل MM5 از سایت سازمان NOAA[6] (https://www.ncdc.noaa.gov) و سازمان UCAR[7] (https://www.ucar.edu/) دریافت شدند. اطلاعات دریافت شده تصاویری با تفکیک مکانی ۰/۵×۰/۵ درجه و دوره زمانی ۲۰۰۰ – ۲۰۱۰ بودند که بر اساس طول و عرض منطقه مورد مطالعه تهیه شدند. به دلیل وجود خطاهای

---

1 Huffman
2 Bolvin
3 National Aeronautic and Space Administration
4 Ward
5 Grell
6 National Oceanic and Atmospheric Administration
7 University Corporation for Atmospheric Research

قاعده‌مند در برونداد مدل‌های پیش‌بینی عددی، قبل از استفاده از داده‌ها به عنوان ورودی الگوریتم‌ها، پس‌پردازش آماری روی خروجی مدل انجام شد. علاوه بر اطلاعات ذکر شده داده‌های مربوط به توپوگرافی از سازمان نقشه‌برداری زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) (http://landcover.usgs.gov) با تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه دریافت شد.

شبکه‌بندی داده‌های زمینی بارندگی

داده‌های ماهواره و مدل‌های جوی به صورت تصاویر شبکه‌بندی شده ارائه می‌شوند در حالی که مشاهدات زمینی اطلاعات نقطه‌ای فراهم می‌آورند. یکی از مشکلات موجود در زمینه مقایسه داده‌های به دست‌آمده از منابع مختلف، نمونه‌برداری مکانی متفاوت آنهاست؛ بنابراین داده‌های نقطه‌ای باید با استفاده از روش‌های درون‌یابی مکانی به صورت تصاویر شبکه‌بندی با تفکیک مکانی یکسان با سایر داده‌ها تبدیل شود. در مورد انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی مخصوصاً در مناطقی با توپوگرافی پیچیده مطالعات فراوانی صورت گرفته است. از میان آن‌ها روش زمین‌آمار به عنوان روشی دقیق و قوی در این زمینه شناخته شده است (گوارت[1]، ۱۹۹۹). مطالعات بسیاری اثبات کرده‌اند که برای بارندگی روش کریجینگ با روند خارجی (KED[2]) که از ارتفاع به عنوان متغیر ثانویه استفاده می‌کند در مناطق با توپوگرافی پیچیده بهتر از سایر روش‌ها عمل می‌کند (میسون[3] و فری[4]، ۲۰۱٤: ٤٥٤٣؛ توبین[5] و همکاران، ۲۰۱۱: ۷۷). با وجود این، در این تحقیق الگوریتم‌های دیگر زمین‌آمار نیز بر روی داده‌ها آزمایش شد و براساس نتایج اعتبارسنجی (یعنی مقادیر میانگین مربعات خطا (MSE[6]) که با استفاده از معادله ۱ محاسبه شدند) از روش KED برای درون‌یابی بارندگی استفاده شد. معادلات مربوط به روش‌های زمین‌آمار توسط وبستر[7] و اولیور[8] (۲۰۰۱)، به تفصیل شرح داده شده‌اند. الگوریتم زمین‌آمار با استفاده از نرم افزارهای +GS و ArcMap بر روی داده‌ها اجرا شدند. پس از تهیه نقشه‌های توزیع مکانی بارندگی، از دو روش جهت مقایسه داده‌ها استفاده شد. روش اول استفاده از شاخص‌های اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل و تصاویر TRMM بود. برای ارزیابی توام عملکرد مدل MM5 و تصاویر بارندگی ماهواره TRMM ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[9]) در مقایسه با مقادیر داده‌های زمینی بارندگی برای دو محصول ذکر شده، محاسبه شد (معادله ۲). روش دوم استفاده از الگوریتم تشابه و جستجوی مکانی تشابهات و تناقضات میان داده‌ها بود. معادلات مربوط به الگوریتم تشابه در ادامه توضیح داده شده‌اند.

1 Goovaerts
2 Kriging with an External Drift
3 Masson
4 Frei
5 Tobin
6 Mean Square Error
7 Webster
8 Oliver
9 Root Mean Square Error

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\widehat{Z_\iota} - z_i) \qquad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\widehat{Z_\iota} - z_i)} \qquad (۲)$$

در این روابط $\widehat{Z_\iota}$ مقادیر پیش‌بینی شده بارندگی در نقطه i و z_i مقدار اندازه‌گیری شـده بارنـدگی اسـت. n تعـداد کل داده‌ها می‌باشد.

الگوریتم تشابه

به‌منظور یافتن مکان‌هایی که در آنجا، مدل MM5 و داده‌های سنجش‌ازدور الگوی مکـانی- زمـانی بـارش را بهتـر نشان داده‌اند از روش الگوریتم تشابه استفاده شد. در این الگوریتم مقادیر تشابه از معادله (۳) به دست می‌آینـد. اگـر M نشان دهنده ناحیه نقشه و n تعداد نقشه‌های ورودی و $\overline{m_k(x)}$ مقدار اسـتاندارد شـده نقشـه M_k در مکـان x باشـد، برای هر نقطه شبکه ($x\varepsilon M$) المان‌های ماتریس اختلاف $D(x)\varepsilon R^{n,n}$ با استفاده از معادله (۵) شـکل می‌گیرنـد(مریـام[1] و جوت[2]۱۹۸۸: ۹):

$$F(x) = \frac{1}{k}\sum_{s<t,t=1}^{n}|d_{st}(x)| \qquad (۳)$$

$$k = \frac{n(n-1)}{2} \qquad (٤)$$

$$d_{st}(x) = \overline{m_s(x)} - \overline{m_t(x)} \qquad (۵)$$

در این روابط k تعـداد حالت‌هـای مقایسـه دو بـه دو در میـان n نقشـه، $d_{st}(x)$ المان‌هـای مـاتریس اخـتلاف $D(x)\varepsilon R^{n,n}$ برای هر نقطه شبکه ($x\varepsilon M$)، $\overline{m_s(x)}$ مقـدار اسـتاندارد شـده نقشـه M_s در مکـان x، $\overline{m_t(x)}$ مقـدار اتاندارد شده نقشه M_t در مکان x، n ,. . .,$s = 1$ و n ,. .. ,$t = 1$ می‌باشند. با حل مـاتریس اخـتلاف بـرای هـر نقطه شبکه، میزان تشابه و تناقض میان تصاویر آشکار می‌گردد. $F(x)$ میـانگین اخـتلاف بـین نقشـه‌ها در مکـان x را نشان می‌دهد و بنابراین اگر نقشه‌ها مشابه باشند مقدار $F(x)$ کم است و اگر متفاوت باشند این مقـدار زیـاد اسـت. در این تحقیق قبل از اجرای الگوریتم تشابه با استفاده از رابطه زیر استاندارد سازی انجام گرفت:

$$z_p(y_{ij}) = \frac{y_{ij} - ymin_j}{ymax_j - ymin_j} \qquad (٦)$$

در رابطه (٦) $ymin_j$ و $ymax_j$ مقادیر بیشینه و کمینـه متغیـر مشـاهده شـده y_j می‌باشـند. بطوریکـه $j = 1, \ldots, n$ تغییر می‌کند و n تعداد متغیرها، مانند ، دما، بارنـدگی رطوبـت اسـت. y_{ij} مشـاهدات y_j می‌باشـد کـه $i = 1, \ldots, r_j$ تغییر می‌کند و r_j تعداد مشاهدات متغیـر y_j اسـت (هامـان[3] و هرزفلـد[4]، ۱۹۹۱: ٦۲۱). در ایـن پـژوهش از

1 Merriam
2 Jewett
3 Hamann
4 Herzfeld

تبدیل خطی محدوده داده‌ها با فواصل (۰،۱) استفاده شد و سپس محاسبات در داخل منطقه مورد مطالعه انجام گردید. پس از عملیات استانداردسازی، مقادیر $F(X)$ برای تمام منطقه مورد مطالعه محاسبه و در هر موقعیت $x\varepsilon M$ یک مدل شبکه‌ای برای نقشه تشابه F ساخته شد. همچنین در مورد تحلیل کیفی و کمی تشابهات و تناقضات موجود در نقشه‌های خروجی الگوریتم تشابه، به صورت زیر عمل شد:

چنانچه نسبت محدوده استانداردسازی به کار رود، آنگاه مقادیر F در نقشه تشابه در بازه صفر و یک قرار می‌گیرند. در این صورت مقادیر نزدیک صفر نشان دهنده تشابه خوب بین نقشه‌های ورودی در یک مکان خاص بوده و مقادیر بالاتر، نشان‌دهنده تشابه ضعیف‌تر می‌باشند. با توجه به مطالعات انجام شده در مقایسه ۹ نقشه یا بیشتر، اگر مقدار F زیر ۰/۲ باشد تشابه خوب و بالای ۰/۵ تشابه ضعیف را نشان می‌دهد (مریام و جووت، ۱۹۸۸). طبقه‌بندی مقادیر تشابه (F) در جدول (۱) نشان داده شده است. در این مطالعه الگوریتم‌های استانداردسازی و تحلیل‌ها با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB برای هر نقطه شبکه از نقشه‌ها اجرا شدند. برنامه الگوریتم تشابه نیز در نرم افزار MATLAB نوشته و بر روی تمامی نقشه‌ها اجرا شد تا تشابهات بین مجموعه داده‌ها و نتایج مدل از لحاظ تحلیل مکانی و زمانی کشف شود. در نهایت توسط نرم افزار MATLAB نتایج حاصل ترسیم شدند.

جدول ۱. طبقه‌بندی مقدار F

میزان تشابه	F value
خوب	۰/۱–۰/۰
نسبتاً خوب	۰/۲–۰/۱
متوسط	۰/۳–۰/۲
نسبتاً ضعیف	۰/٤–۰/۳
ضعیف	۰/۵–۰/٤

٤. بحث و نتایج

زمین آمار

جدول (۲) اعتبارسنجی روش‌های چند متغیره زمین آمار را برای دوره سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. مقادیر MSE نشان می‌دهند که تا چه حد روش‌ها، تغییرات بارندگی را مشخص کرده‌اند. هر چه مقدار MSE به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت روش در پیش‌بینی مقادیر بیشتر است. طبق جدول (۲) در شبیه‌سازی مقادیر بارندگی، تفاوت بین دقت دو روش در بعضی از ماه‌ها معنی‌دار نیست، اما به‌طورکلی روش KED مقادیر MSE کمتری نسبت به روش COK دارد. در این مطالعه با توجه به مقادیر ماهانه MSE روش KED با متغیر ثانویه مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) برای درون‌یابی بارندگی و تحلیل مکانی بارندگی انتخاب شد.

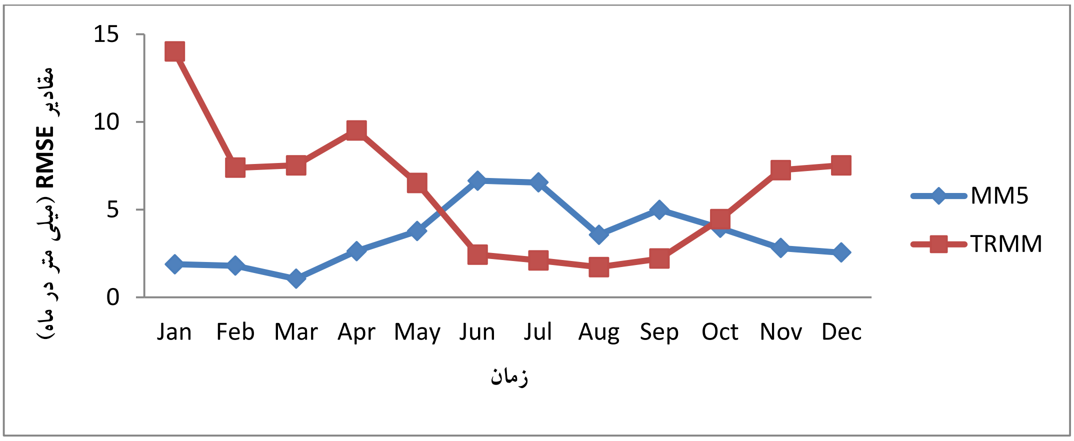
جدول۲. مقادیر MSE روش‌های KED و COK برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی بارندگی در مقیاس ماهانه و سالانه

بارندگی	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Annual
KED	۰/۲۵	۰/۲٦	۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۲۹	۰/٦۸	۰/۵۵	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۱٤	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/٤۹
COK	۰/٤۳	۰/٤٤	۰/٤۷	۰/۳۷	۰/۵۳	۰/۷۸	۰/٦۷	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۳٤	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۷۷

اعتبارسنجی داده‌های MM5، TRMM و داده‌های شبکه‌بندی شده ایستگاهی در مقیاس ماهانه

شکل (۲) مقادیر RMSE مدل MM5 و TRMM را در مقیاس زمانی ماهانه نشان می‌دهد. مقادیر RMSE با توجه به میانگین ماهانه داده‌های بارندگی ایستگاهی به دست آمده‌اند. هر چه مقدار RMSE کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، تخمین‌ها بهتر انجام گرفته‌اند. با توجه به شکل (۲)، مدل MM5 در ماه‌های گرم مقادیر RMSE بیشتری دارد. بدین معنی که بارندگی در ماه‌های گرم با دقت کمتری نسبت به ماه‌های سرد پیش‌بینی شده است. همچنین بیشترین مقدار مربوط به اواخر فصل بهار و اوایل تابستان می‌باشد. دوربوت[1] و همکاران (۲۰۰٦: ۱) نیز در بررسی‌های خود به نتیجه مشابه دست یافتند و دلیل این امر را بارندگی‌های همرفتی و عدم توانایی مدل در پیش‌بینی دقیق‌تر این نوع از بارندگی عنوان کردند. الگوی تغییر مقادیر RMSE در نمودار شکل (۲) برای TRMM معکوس مدل MM5 است. بیشترین مقدار RMSE برای TRMM در ماه ژانویه و تقریباً برابر با ۱٤ به دست آمده است. دلیل این امر ممکن است مشابهت پراکندگی انرژی مایکروویو رفتار یخ روی زمین مانند بارش و یا باران یخ زده در اتمسفر باشد. نتایج اچوا[2] و همکاران (۲۰۱٤: ۳۱۷۹) نیز مانند یافته‌های تحقیق حاضر، نشان دادند که تولیدات ماهواره‌ای TRMM در مناطق پوشیده از یخ و ماه‌های سرد فصل زمستان عملکرد ضعیفی دارند. در ماه‌های گرم، سنجنده TRMM بارندگی را بهتر از مدل برآورد کرده بود؛ اما با توجه به محدوده تغییرات RMSE، مدل MM5 مقادیر بارندگی را با نوسان ماهانه کمتری نسبت به TRMM پیش‌بینی کرده است. به جز ماه‌های تابستان در بقیه سال، مقادیر RMSE مدل کمتر از TRMM می‌باشد. بدین معنی که مدل MM5 بارندگی را با دقت بیشتری نسبت به TRMM پیش‌بینی کرده است. نتیجه به دست آمده مشابه نتایج اکتر[3] و اسلام[4] (۲۰۰۷: ۷۵) بود.

1 Drobot
2 Ochoa
3 Akter
4 Islam



شکل ۲. اعتبارسنجی داده‌های MM5 و TRMM در مقیاس ماهانه

مقایسه مکانی-زمانی داده‌های اندازه‌گیری ایستگاه زمینی، MM5 و TRMM با استفاده از الگوریتم تشابه

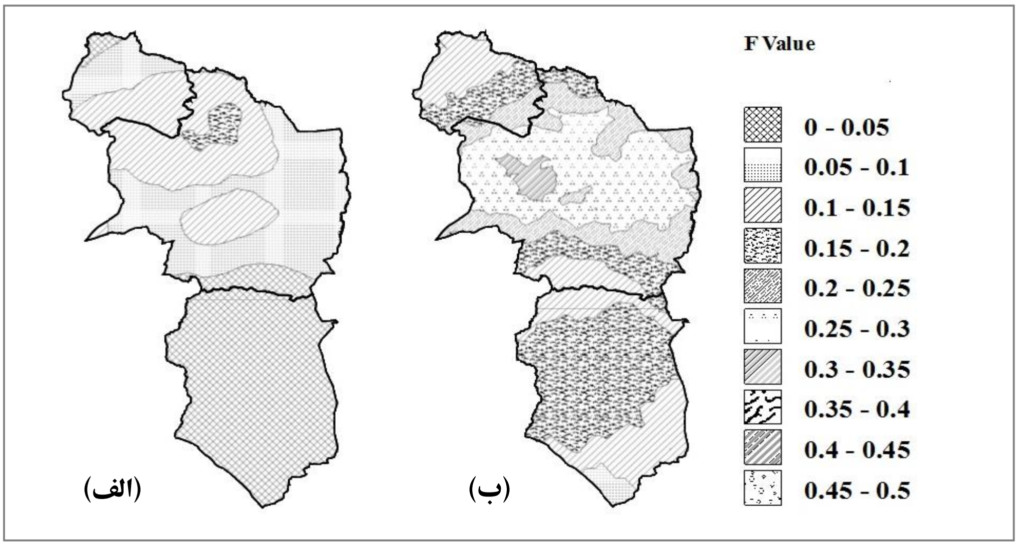
در بکارگیری نتایج الگوریتم تشابه دو عامل یعنی مقدار تشابه (F) به دست آمده از معادله (۳) و یکنواختی توزیع مکانی مقادیر تشابه در منطقه مد نظر قرار می‌گیرد. بدین صورت که هر چه مقدار F کمتر و توزیع آن یکنواخت‌تر باشد، تشابه مکانی، بیشتر است. نوع تشابه در هر ناحیه نیز از جدول (۱) تعیین می‌گردد.

تغییرات درون سالانه داده‌های مشاهده‌ای بارندگی (نقشه‌های حاصل از KED)

شکل (۳) تغییرات درون سالانه بارندگی داده‌های مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. شکل ۳-الف مربوط به فصل سرد و شکل ۳-ب مربوط به فصل گرم می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در فصل سرد مقادیر F در منطقه مورد مطالعه بیشتر بین صفر تا ۰/۱ تغییر داشته و در سطح وسیعی از منطقه مقادیر تشابه بین ۰/۰۵-۰/۱ می‌باشند. همچنین مقادیر تشابه در ناحیه مورد مطالعه با توزیع یکنواختی پراکنده شده‌اند که این نشان دهنده تغییرات درون سالانه کم بارندگی در فصل‌های سرد سال است (شکل ۳- الف). در شکل (۳- ب) که مقادیر بارندگی برای فصل‌های گرم سال می‌باشد، مقادیر تشابه در جنوب و شمال منطقه بین ۰/۱ تا ۰/۲ تغییر می‌کند که نسبت به همین مقادیر در فصل‌های سرد سال بیشتر است و داده‌ها تغییرات درون سالانه بیشتری نسبت به فصل سرد دارند. همچنین نواحی مرکزی منطقه مورد مطالعه از مقادیر تشابه بالاتری برخوردار بوده و مقادیر F در این ناحیه بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ تغییر کرده است و بیانگر این است که تغییرات درون سالانه بارندگی در فصل‌های گرم سال و در نواحی مرکزی بیشتر بوده است. یکی از دلایل این تفاوت می‌تواند وجود خطا در داده‌های مشاهده‌ای باشد (دوربوت[1] و همکاران ۲۰۰۶: ۱). با توجه به شکل ۳ - الف و ۳ - ب می‌توان گفت که تغییرات درون سالانه بارندگی در فصل گرم خیلی

1 Drobot

بیشتر از فصل سرد بوده است. تغییر نوع بارندگی و همرفتی بودن آن می‌تواند دلیل این امر باشد. به خصوص در نواحی مرکزی که دارای ارتفاع بلندتر و توپوگرافی پیچیده‌تری است.

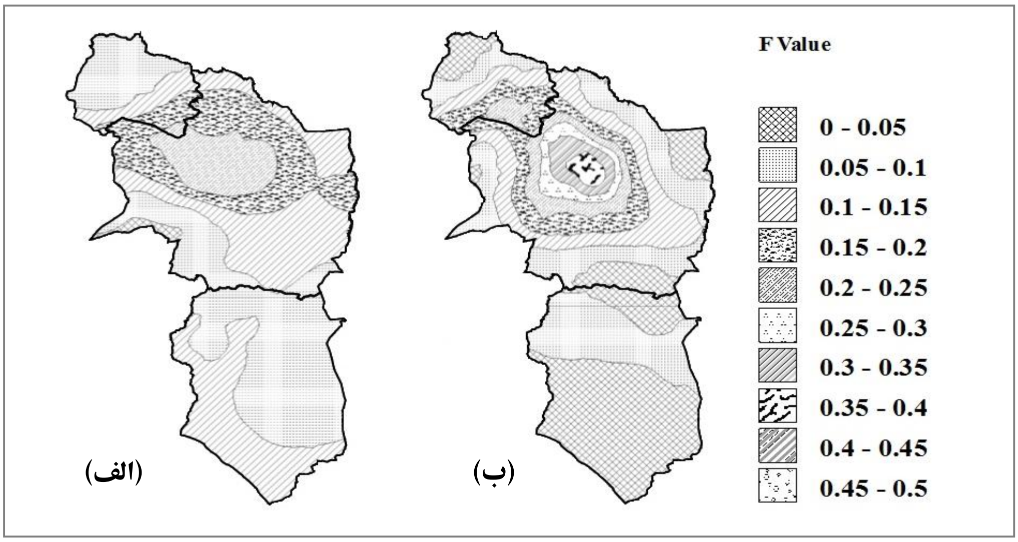


شکل۳. تغییرات درون سالانه داده‌های مشاهده‌ای برای متغیر بارندگی، الف : فصل سرد، ب : فصل گرم

تغییرات درون سالانه خروجی مدل MM5

تغییرات درون سالانه بارندگی مدل MM5 در شکل (٤) نشان داده شده است. با توجه به شکل، این تغییرات در مدل MM5 کم بوده و در هر دو نقشه تشابه، فصل سرد (شکل ٤– الف) و فصل گرم (شکل ٤– ب) با مقادیر F قابل مشاهده می‌باشند. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در فصل سرد مقادیر F در منطقه مورد مطالعه بیشتر بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ تغییر داشته و اغلب مساحت منطقه را مقادیر تشابه بین ۰/۱ – ۰/۱۵ در برگرفته است. همچنین پراکندگی مقادیر تشابه در منطقه از توزیع یکنواختی برخوردار می‌باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که نقشه‌های تشابه مدل MM5 بین تابستان و زمستان متفاوت است. با توجه به شکل ٤– ب نواحی مرکزی منطقه مورد مطالعه از مقادیر تشابه بالاتری برخوردار بوده و مقادیر F در این ناحیه بین ۰/۱۵ تا ۰/٤ تغییر کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات درون سالانه بارندگی در فصل‌های گرم سال و در نواحی مرکزی بیشتر بوده است. ممکن است وجود ارتفاعات و توپوگرافی پیچیده این ناحیه دلیل آن باشد. با توجه به جدول (۱) که طبقه‌بندی مقادیر F را نشان می‌دهد و با توجه به مقدار F به دست آمده در شکل، به‌طورکلی مدل، بارندگی فصل سرد را خوب و بارندگی فصل گرم در نواحی مرکزی منطقه را نسبتاً ضعیف پیش‌بینی کرده است. نتیجه اخیر با تحقیق انجام شده توسط هدایتی

دزفولی و آزادی (۱۳۸۹: ۱۲۹) مطابقت داشت. ایشان چیرگی نقش ناپایداری کژفشاری نسبت به ناپایداری همرفتی در سامانه‌های فصل زمستان را دلیل موفقیت مدل در پیش‌بینی‌های فصل سرد عنوان کرده‌اند.



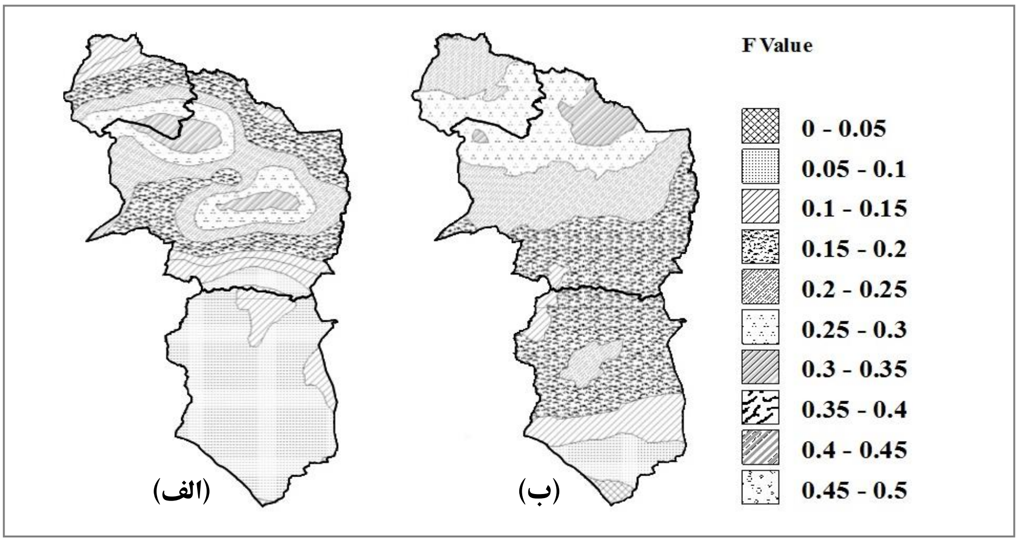
شکل٤. تغییرات درون سالانه خروجی مدل MM5 برای متغیر بارندگی، الف : فصل سرد، ب : فصل گرم

تغییرات درون سالانه بارندگی ماهواره TRMM

شکل ۵ الف و ب میانگین مقادیر تشابه محاسبه شده در سری زمانی ۲۰۰۰–۲۰۱۰ داده‌های TRMM را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۵– الف مشاهده می‌شود که در فصل سرد، جنوب منطقه دارای مقادیر تشابه ۰/۰۵ –۰/۱ است و توزیع مقادیر نیز یکنواخت می‌باشد؛ اما نواحی شمالی و مرکزی، از مقادیر تشابه بالاتری برخوردار هستند. بطوریکه مقدار F در این نواحی از ۰/۲ تا ۰/۳۵ متغیر است. همچنین توزیع مقادیر چندان یکنواخت نیست. با توجه به این نکات می‌توان نتیجه گرفت که تولیدات TRMM مقادیر بارندگی در فصل سرد را در جنوب منطقه نسبتاً خوب و در شمال و مرکز آن نسبتاً ضعیف برآورد کرده‌اند. تغییرات درون سالانه فصل گرم نیز در شکل ۵–ب نشان داده شده است. چنانچه از شکل مشخص است بیشتر مساحت منطقه را مقادیر ۰/۱ تا ۰/۲ در برگرفته‌اند و توزیع مقادیر تشابه در منطقه یکنواخت‌تر از فصل سرد (شکل ۵–الف) می‌باشد. بیشترین مقدار F در قسمت شمال شرقی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود؛ اما به‌طورکلی TRMM بارندگی فصل گرم را نسبتاً خوب برآورد کرده است. همچنین با مقایسه شکل ۵–الف با شکل‌های ٤–الف و ۳–الف مشخص می‌شود که رفتار مقادیر بارندگی TRMM عکس داده‌های مشاهداتی زمینی و MM5 است؛ مانند مطالعه وونگ[1] و چیو[2] (۲۰۰۸: ۱۰۵)، نتایج این تحقیق نیز

1 Wong
2 Chiu

نشان دادند که به‌طورکلی تغییرات درون‌سالانه زیادی بین اندازه‌گیری بارندگی و داده‌های سنجش‌ازدور وجود دارد. همچنین با مقایسه شکل‌های ۳، ٤ و ٥ با یکدیگر متوجه می‌شویم که مدل MM5 بهتر از TRMM تغییرات فصلی بارندگی را نمایان کرده است. چرا که تغییرات آن در هر دو فصل، با داده‌های مشاهدات زمینی مشابه است.



شکل ٥. تغییرات درون سالانه تصاویر بارندگی TRMM، الف : فصل سرد، ب : فصل گرم

٥. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، داده‌های بارندگی مدل MM5، سنجنده TRMM و مشاهدات ایستگاهی در محدوده سال‌های ۲۰۰۰–۲۰۱۰ و شمال شرق ایران توسط روش آماری و الگوریتم تشابه مقایسه و صحت‌سنجی شدند. هدف از این کار بررسی امکان استفاده از داده‌های مدل‌سازی شده در مناطق فاقد داده و شناسایی مکان‌ها و زمان‌هایی بود که محصولات مذکور با یکدیگر و داده‌های واقعی همخوانی بیشتری دارند. نتایج اعتبارسنجی آماری به صورت ماهانه نشان دادند که مدل MM5 در ماه‌های سرد بهتر از ماه‌های گرم مقادیر بارندگی را پیش‌بینی کرده است. نتیجه به دست آمده با نتایج دوربوت[1] و همکاران (۲۰۰٦: ۱) تطابق داشت؛ اما تصاویر سنجش‌ازدور بر عکس مدل MM5 در ماه‌های سرد بیشترین خطا را داشتند. با توجه به این مورد توصیه می‌شود کاربرد داده‌های TRMM در فصول سرد و نواحی پوشیده از برف و یخ با احتیاط انجام شود. همچنین در اغلب موارد مدل MM5 در پیش‌بینی بارندگی بیش‌برآورد داشت. آزادی و همکاران (۱۳۸۹: ۱٤۸) نیز در بررسی‌های خود به نتیجه مشابه دست یافته‌اند. بر خلاف

1 Drobot

یافته‌های اچوا[1] و همکاران (۲۰۱٤: ۳۱۷۹) که در مناطق اکوادور و پرو انجام شد، در این مطالعه (شمال شرق ایران)، داده‌های TRMM نسبت به خروجی مدل پیش‌بینی عددی دارای خطای بیشتری در برآورد بارندگی بود.

در این پژوهش مجموعه داده‌های مختلف تغییرات بارندگی را در منطقه مورد مطالعه به‌خوبی تخمین زده بودند؛ اما برآوردهای مناطق مرکزی مخصوصاً ارتفاع بالای ۱۵۰۰ متر در محصولات دقت پایینی داشتند. در بررسی تغییرات درون سالانه و فصلی، مشخص شد که تفاوت زیادی میان تغییرات درون‌سالانه تصاویر سنجش‌ازدور و مقادیر واقعی بارندگی (KED) وجود دارد؛ اما تغییرات درون سالانه مدل با داده‌های واقعی همخوانی داشت.

نتایج تحقیق حاضر نشان دادند که در صورت نبود اطلاعات ایستگاهی کافی برای بارندگی در یک منطقه، می‌توان از داده‌های مدل MM5 و TRMM برای پر کردن خلأ موجود در این مورد استفاده کرد. این در حالیست که پیوستگی مکانی–زمانی داده‌های بارندگی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مدیریت هواشناسی کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. در موارد کاربردی مانند هشدار سیل یا مدیریت مخاطراتی مانند خشکسالی، نیاز به داده‌هایی با تفکیک زمانی و مکانی بالا وجود دارد. با توجه به کمبود امکانات و نبود ایستگاه‌های باران سنجی و هیدرولوژی، استفاده از داده‌های مدل‌سازی بارندگی و محصولات سنجش‌ازدور می‌تواند راهگشا باشد؛ اما یافته‌های تحقیق حاضر نشان دادند که نمی‌توان فقط از یک مجموعه داده برای تمام مناطق و یا فصول مختلف در نواحی فاقد داده استفاده کرد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در آینده علاوه بر صحت سنجی مکانی– زمانی به جای روش‌های ساده آماری، روش‌های تلفیق داده نیز برای تولید داده‌های با کیفیت و دقت بالا مورد بررسی قرار گیرند.

کتابنامه

احمدیان، ج؛ شیبانی، د؛ عراقی، ح؛ شیرمحمدی، ر؛ مجرد، م؛ ۱۳۸۱. طبقه بندی اقلیمی کشاورزی در جهت مدیریت منابع آب در توسعه پایدار کشور. یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. تهران دی ماه ۱۳۸۱. صفحه ۵۹۳–٦۰۵.

آزادی، م؛ تقی زاده، ا. م؛ معماریان، ح؛ ۱۳۸۹. مقایسه پیش‌بینی بارش دو مدل منطقه‌ای MM5 و WRF بر روی ایران. چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. تهران، اردیبهشت ۱۳۸۹. موسسه ژئوفیزیک، فیزیک فضا. صفحه ۱٤۸–۱۵۲.

هدایتی دزفولی، ا؛ آزادی، م؛ ۱۳۸۹. راستی آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه‌ای MM5 بر روی ایران. مجله فیزیک زمین و فضا. ۳٦ (۳): ۱۱۵ تا ۱۲۹.

Akter, N., & Islam, Md. N., 2007. Use of MM5 model for weather forecasting over Bangladesh region. *BRAC University Journal*, 4(1),75-79.

Box, J. E., & Bromwich, D. H., 2004. Greenland ice sheet surface mass balance 1991–2000: application of Polar MM5 mesoscale model and in situ data. J. Geophys. Res, 109, 1–21.

---

1 Ochoa

Drobot, S., Maslanik, J., Herzfeld, U. C., Fowler, C., & Wu, W., 2006. Uncertainty in temperature and precipitation datasets over terrestrial regions of the Western Arctic. *Earth Interactions,***10.** [Available online at http://EarthInteractions.org; see the WALE Special Theme.]

Ebert, E., Janowiak, l., & Kidd, C., 2007. Comparison of near-real time precipitation estimates from satellite observations and models, Bulletin of the American Meteorological Society.88, 48-64.

Goovaerts, P., 1999. Performance Comparison of Geostatistical Algorithms for Incorporating Elevation into the Mapping of Precipitation. The IV International Conference on Geo Computation was hosted by Mary Washington College in Fredericksburg, VA, USA, on 25-28 July 1999.

Grell, G. A., Dudhia, J., Staurer, F. R., 1995. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Tech Note NCAR/TN- 398 +STR. 122, Boulder, Colorado [EB/OL]. http://www.mmm.ucar.edu/mm5/doc1.html/2003-07-19

Hamann, I. M., and U. C. Herzfeld., 1991. On the effects of pre-analysis standardization. J. Geol., 99, 621–631.

Herzfeld, U.C., & Merriam, D F., 1990. A map comparison technique utilizing weighted input parameters. Computer Applications in Resource Estimation and Assessment for Metals and Petroleum, G. Gaál and D. F. Merriam, Eds. *Journal of Computers and Geology, 7: 43–52*.

Huffman, G. J., and Bolvin, D. T., 2012. TRMM and other data precipitation data set documentation, available at ftp://precip.gsfc.nasa gov, last access: 25 May2014.

Huffman, G. J., Robert F., Adler, Bruno Rudolf., Udo Schneider., Peter R. Keehn., 1995. Global Precipitation Estimates Based on a Technique for Combining Satellite-Based Estimates. Rain Gauge analysis, and NWP Model Precipitation Information. Journal of Climate, 8(5), 1284-1295.

Masson, D., & Frei, C., 2014. Spatial analysis of precipitation in a high-mountain region: exploring methods with multi-scale topographic predictors and circulation types, Hydrol. Earth Syst Sci, 18, 4543–4563.

Meij, A.D., Gzella, A., Cuvelier, C., Thunis, P., Bessagnet, B., Vinuesa, J.F., Menut, L., & Kelder, H.M., 2009. The impact of MM5 and WRF meteorology over complex terrain on CHIMERE model calculations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *9*(17), 6611-6632.

Merriam, D. F., & Jewett, D. G., 1988. Methods of thematic map comparison. *Current Trends in Geomathematics,* D. F. Merriam, Ed., Plenum Press, 9–18.

Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., Willems, P., Cayetano, S., Cuenca, U. De, Brussel, V. U., 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific – Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18,* 3179–3193.

Scheel, M. L. M., Rohrer, M., Huggel, Ch., Santos Villar, D., Silvestre, E., and Huffman, G. J., 2011. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution, Hydrol. Earth Syst. Sci, 15, 2649–2663.

Smith, E. A., 2007. International Global Precipitation Measurement (GPM) Program and Mission: An overview, in: Levizzani, V., Bauer, P., and Turk, F. J.: Measuring Precipitation from Space: EURAINSAT and the Future. Advances in Global Change Research, 28, 611–653, Springer, Dordrecht, Netherlands, 2007.

Tobin, C., Nicotina, L., Parlange, M. B., Berne, A., and Rinaldo, A., 2011. Improved interpolation of meteorological forcings for hydrologic applications in a Swiss Alpine region. J. Hydrol, 401, 77–89.

Ward, E., Buytaert, W., Peaver, L., and Wheater, H., 2011. Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: a water resources perspective. Advance. Water Resour., 34, 1222–1231.

Webster, R., & Oliver, M. A., 2001. Geostatistics for environmental scientists. Chichester: John Wiley & Sons.

Wong, W. F. J., & Chiu, L. S., 2008. Spatial and Temporal Analysis of Rain Gauge Data and TRMM Rainfall Retrievals in Hong Kong. *Geographic Information Sciences*, *14*(2), 105–112.